Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 56 (1965)

Heft: 18

Artikel: Probleme beim Planen von Ultraschall-Waschanlagen

Autor: Gollmick, H.J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916399

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Probleme beim Planen von Ultraschall-Waschanlagen

Von *H. J. Gollmick*, Frankfurt am Main

621.9.048.6:621.9.015

Es werden zunächst die physikalischen Grundlagen und der Wirkungsmechanismus des Ultraschalls beschrieben. Anschliessend werden die heute am meisten verwendeten Schwinger- und Hochfrequenzgeneratortypen kritisch dargestellt. Nach Hinweis auf die Bedeutung der chemischen Reinigungsflüssigkeiten und eingehender Voruntersuchungen werden die häufigsten Arbeitsverfahren gegenübergestellt, und es wird auf die vielfältigen Ausführungsarten von Reinigungsbehältern eingegangen.

L'auteur décrit tout d'abord les bases physiques et le mécanisme d'action des ultra-sons, puis il passe en revue les principaux types d'oscillateurs et de générateurs à haute fréquence utilisés actuellement. Après avoir signalé l'importance des liquides de nettoyage chimique et des essais préalables, il compare entre eux les procédés les plus usuels et décrit les nombreuses exécutions de récipients de nettoyage.

Es ist in den letzten Jahren mehr und mehr anerkannt worden, dass man die Oberflächen harter Gegenstände, mögen sie aus Metall, Glas, Keramik oder Kunststoff bestehen, mittels Ultraschall so hervorragend reinigen kann, wie das durch Bürsten von Hand o. ä. nicht möglich wäre. So benützt man dieses Arbeitsverfahren in steigendem Masse bei der industriellen Fertigung wie auch für Überholungsaufgaben. Das Reinigen mittels Ultraschall unterscheidet sich aber deutlich von den bisherigen Waschmethoden. Um eine entsprechende Waschanlage möglichst wirkungsvoll und wirtschaftlich aufzubauen, muss man die Besonderheiten des Ultraschalls beachten. Diese sind aber weiten Interessentenkreisen wenig bekannt. Darum soll im vorliegenden Aufsatz nach einer Beschreibung der Ultraschall-Erzeugung auseinandergesetzt werden, was beim Planen einer Ultraschall-Waschanlage besonders zu beachten ist.

1. Physikalisches über das Reinigen mittels Ultraschall

1.1 Was ist Ultraschall?

Unter «Schall» versteht man mechanische Schwingungen der als Übertragungsmedium dienenden Materie. Meist handelt es sich dabei um longitudinale Schwingungen, d. h. Verdichtungen und Verdünnungen in periodischer Folge, wie das z. B. beim Hören von den Schwingungen der Luftteilchen her bekannt ist. Ein erwachsener Mensch vermag etwa 16 bis 16 000 Schwingungen pro Sekunde (16 Hz bis 16 kHz) zu hören. Von «Ultraschall» spricht man nun, wenn die Frequenz der mechanischen Schwingungen höher ist, so dass das menschliche Ohr diese nicht mehr wahrnehmen kann.

Da es sich um unhörbare Schwingungen handelt, erzeugt man Ultraschall meist wesentlich energiereicher, d. h. «lautstärker», als Schallschwingungen. Beim Reinigen mittels Ultraschall ist die spezifische Schalleistungsdichte grössenordnungsmässig 10^9mal stärker als dies bei einem Zimmerlautsprecher der Fall ist. Dabei arbeitet man meistens im Bereich der niedrigen Ultraschallfrequenzen zwischen 20 und 40 kHz. Nur selten benützt man heute noch die früher vielfach angewandten hohen Frequenzen von 400 bis 1000 kHz.

1.2 Kavitation

Der zu reinigende Gegenstand muss sich immer in einer Flüssigkeit befinden. Diese dient zur Übertragung der Ultraschallschwingungen und gleichzeitig zum Schmutzabtransport. Chemische Zusätze zur Reinigungsflüssigkeit beschleunigen die Wirkung. Bei dem grossen Energieinhalt der Ultraschallschwingungen kann der Zusammenhalt der Flüssigkeitsmoleküle während der Verdünnungsphase (Zugphase) an einzelnen Stellen aufreissen. Auf diese Weise entstehen winzige Hohlraumbläschen, die nur einen recht niedrigen Gasdruck aufweisen. Diese Hohlraumbildung nennt man Kavitation. Bei den hier vorkommenden Zugkräften reisst eine Flüssigkeit nur an Instabilitätsstellen, «Keimen», auseinander. Ausser in der Flüssigkeit selbst feinverteilten, kleinsten Gasbläschen stellen die Grenzflächen zwischen Flüssigkeit und festem Körper mit ihren mikroskopisch kleinen Spitzen und Zacken solche Instabilitätsstellen dar, an denen Kavitationsbläschen auftreten.

Nun befindet sich an der Stelle der grössten Verdünnung nach einer halben Schwingungsdauer die stärkste Verdichtung, d. h. der grösste Überdruck. Es bricht deshalb das Kavitationsbläschen ausserordentlich schnell in sich zusammen. Der geringe Gasdruck in dem Hohlraum bedingt dabei einen sehr harten Zusammenprall. Hiedurch wird in der nächsten Umgebung des Kavitationsbläschens Energie frei, die sich als Überdruck der Grössenordnung von 1000 kg/cm² und als Strömung auswirkt. Festkörper-Oberflächen, an denen ja mehr Kavitationskeime vorhanden sind als in der Flüssigkeit selbst, werden auf diese Weise intensiv mechanisch von anhaftenden Fremdteilchen gesäubert. Man kann das als sehr kräftiges «Mikro-Schrubben» bezeichnen, zumal sich die mechanische Wirkung der Kavitation auch auf Hohlräume, Kapillaren u. ä. erstreckt. Voraussetzung hiefür ist, dass der zu reinigende feste Körper hart ist, so dass also die Ultraschallschwingungen an seiner Oberfläche gut reflektiert werden. Deshalb lassen sich auch Textilien oder ähnliche weiche Gegenstände bedeutend schlechter mittels Ultraschall reinigen.

33'958 - 967

Die Wirkung jedes einzelnen Kavitationsbläschens ist nur auf einen Mikrobereich beschränkt. Doch erfolgt das Entstehen und Zusammenklatschen dieser Bläschen räumlich und zeitlich statistisch verteilt. Wenn man also die Reinigungsflüssigkeit so auswählt, dass in ihr eine möglichst kräftige Kavitation entsteht, so heisst das, dass nicht nur jedes einzelne Bläschen beim Zusammenbrechen eine grosse mechanische Energie freigeben soll, sondern dass vor allem möglichst viele Bläschen wirksam werden sollen.

Man hat seit langem erkannt, dass die Kavitation die Reinigungswirkung des Ultraschalls verursacht. Darum arbeitet man auch fast ausschliesslich im niederfrequenten Ultraschallbereich, bei ca. 20 bis 40 kHz, weil die Kavitation mit abnehmender Frequenz immer kräftiger wird, wobei man vorteilhafterweise eine nicht zu kleine Ultraschallenergie verwendet. Früher, als man noch die bei den hohen Frequenzen stärkeren Beschleunigungskräfte in einem Ultraschallwellenfeld für das Reinigen verantwortlich machen wollte, benützte man den Frequenzbereich zwischen 400 und 1000 kHz. Wenn man damals nicht mit einer meist nur für einfachere Reinigungsaufgaben ausreichenden, geringen Energiedichte arbeiten wollte, dann mussten die entsprechenden Anlagen mit einer sehr kleinen Schwingerfläche ausgerüstet werden, was zu einem grösseren technischen Aufwand beim Transportsystem führte. Somit ist in der ersten Zeit des Ultraschallreinigens diese neue Arbeitsmethode nur für hochwertige Kleinteile interessant gewesen, während sie jetzt bei den grösseren Schwingerflächen des niederfrequenten Ultraschalls weitergehend eingesetzt wird.

2. Ultraschall-Erzeugung

Um für Reinigungsaufgaben Ultraschall in einer Flüssigkeit zu erzeugen, verwendet man immer feste Körper als Ultraschallschwinger. Diese sind an einen Hochfrequenzgenerator angeschlossen und verwandeln die elektrische Hochfrequenz-Energie in mechanische Schwingungen der gleichen Frequenz, sie stellen also elektro-mechanische Wandler (transducer) dar.

2.1 Ultraschallschwinger

Nach der Art der elektro-mechanischen Energieumwandlung unterscheidet man zwischen magnetostriktiven und piezoelektrischen Ultraschallschwingern.

2.1.1 Magnetostriktive Schwinger. Unter Magnetostriktion versteht man die Eigenschaft bestimmter Materialien, hauptsächlich von Nickel, in dem Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule ihre Länge zu ändern. Ein Nickelstab, der sich in einem von einem hochfrequenten elektrischen Strom erzeugten magnetischen Wechselfeld einer Spule befindet, wird nur dann zu wirklich energiereichen Längsschwingungen angeregt, wenn die elektrische Frequenz mit der mechanischen Eigenfrequenz des Stabes übereinstimmt. Es handelt sich also immer um Resonanzschwinger, ähnlich wie bei einer Stimmgabel.

Fig. 1 zeigt einen praktisch benützten magnetostriktiven Nickelschwinger der Abmessungen 85 × 175 mm, mit der Resonanzfrequenz von fast 20 kHz. Der Schwinger besteht nicht aus Nickelstäben, sondern aus vielen dünnen Blechen, die wie bei einem Transformator geschichtet sind. Der zum Aufbau des magnetischen Wechselfeldes erforderliche Hochfrequenzstrom fliesst über ein einfaches Kabel, das durch

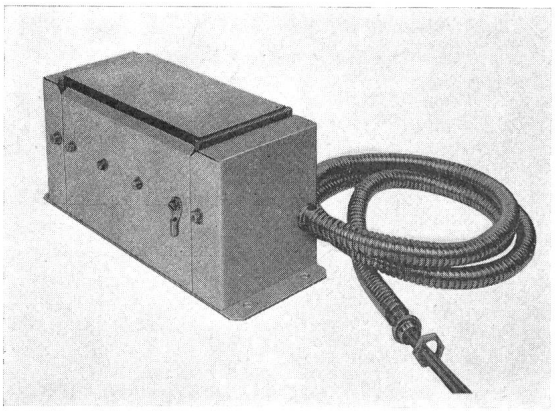

Fig. 1
Gekapselter Tauchschwinger für 20 kHz
Schwingerfläche 85 × 175 mm

Fenster in den Blechen durch und um den Schwinger in Längsrichtung gewunden ist. Das Kabel ist mittels seitlicher Abdeckungen gegen mechanische Beschädigungen geschützt. Ein derartiges Nickelschwingerpaket kann in die meisten Reinigungsflüssigkeiten hineingelegt werden, weshalb man es als «Tauchschwinger» bezeichnet. Mit diesen Schwingern erzeugt man im niederfrequenten Ultraschallbereich die grössten Schalleistungsdichten.

In den letzten Jahren hat sich eine andere Anordnung der Nickelschwingerbleche hervorragend bewährt (Fig. 2). Hier sind schmale Einheiten der Bleche mit Zwischenräumen an eine Platte aus rostfreiem Stahl angelötet, so dass fast die gesamte Platte zu verhältnismässig gleich starken Schwingungen angeregt wird. Ein solcher «Plattenschwinger» [1] [1]) kann an Ausbrüche im Boden oder in einer Seitenwand einer Reinigungswanne angeflanscht werden. Bei tiefgezogenen «Schwingwannen» können Nickelschwingerbleche in der gleichen Weise am Boden angeordnet sein (Fig. 3).

Dieser linienförmig-gespreizte Aufbau bringt u. a. folgende Vorteile:

a) Da sich die schwingungserzeugenden Bleche ausserhalb der Reinigungsflüssigkeit in Luft befinden, ist der Wirkungsgrad dieser Anordnung deutlich besser als bei den Tauchschwingern, kann doch die Kabelisolation chemisch nicht angegriffen werden und abgelagerter Schmutz sich nicht zwischen die Windungen setzen.

b) Verglichen mit den kompakten Tauchschwinger-Paketen ist bei gleicher anregender Hochfrequenzleistung die wirksame

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

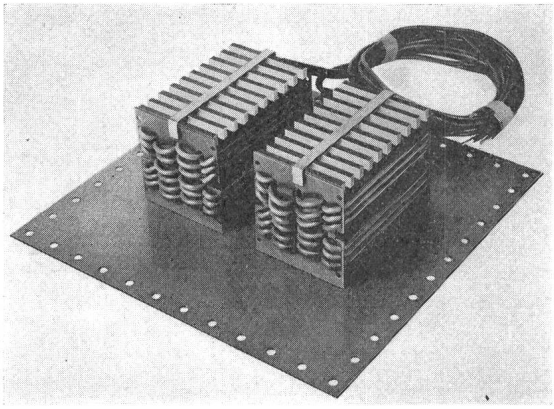

Fig. 2
Plattenschwinger für 20 kHz mit zwei Gruppen von angelöteten Nickelschwingerblechen
in linienförmig-gespreizter Anordnung

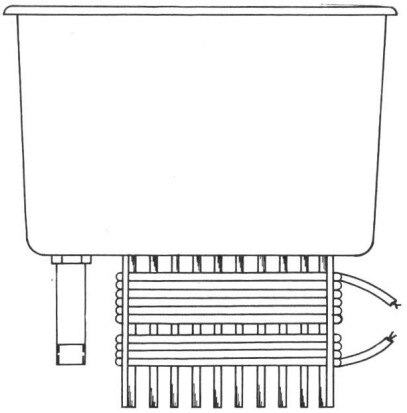

Fig. 3
Schema einer Schwingwanne
mit einer Gruppe von angelöteten Nickelschwingerblechen

Schwingerfläche der Plattenschwinger wesentlich grösser, wobei man je nach der speziellen Anordnung 5- bis 10-fache Vergrösserungen der Fläche mühelos erreicht, wenn die Beschallungswanne in ihren Abmessungen bestimmte Bedingungen erfüllt (s. Ziff. 2.1.3). Trotz deutlicher Verminderung der Schalleistungsdichte pro Flächeneinheit kann dann noch immer eine verhältnismässig grosse Ultraschallenergie im gesamten Flüssigkeitsvolumen vorhanden sein.

Einen Plattenschwinger kann man auch statt an eine Behälterwand in einen luftgefüllten Kasten einflanschen. Man erhält auf diese Weise einen «gekapselten Plattenschwinger», der wie ein Tauchschwinger als luftdichtes, einseitig Ultraschallenergie abstrahlendes Gehäuse direkt in die Reinigungsflüssigkeit hineingelegt wird. Somit verbindet man die Vorteile der Tauchschwinger (leichte Auswechselbarkeit, Möglichkeit, über ein ausgedehnteres Reinigungsgut hin- und herzubewegen u. a.) mit denen der Plattenschwinger (viel grössere und billigere Schwingerfläche u. a.).

Die gekapselten Plattenschwinger haben sich besonders dann hervorragend bewährt, wenn es sich darum gehandelt hat, bereits vorhandene Waschanlagen nachträglich mit einem zusätzlichen Ultraschallteil auszurüsten. Diese Lösung ist gelegentlich interessant bei Reinigungsbehältern, die mit Trichloräthylen oder Perchloräthylen arbeiten, wenn noch verwendungsfähige Wannen durch das Einführen der Ultraschall-Reinigungsmethode nicht stillgelegt werden sollen.

In jüngster Zeit benützt man auch Schwinger aus Ferrit, einem magnetischen Sintermaterial, die ähnlich wie Nickelschwinger angeregt werden. Hier waren zunächst Anfangsschwierigkeiten zu überwinden hinsichtlich Bruchfestigkeit, Alterung, Zusammenbau kleiner Elemente zu ausgedehnteren Schwingerflächen u. a., doch scheinen diese jetzt behoben zu sein.

2.1.2 Piezoelektrische Ultraschallschwinger. Im Gegensatz zu den Verhältnissen bei der Magnetostriktion ändern piezoelektrische Schwinger ihre Dicke in dem Wechselspannungsfeld eines Kondensators. Auch hier handelt es sich ausschliesslich um Resonanzschwinger, d. h. die Frequenz der elektrischen Energie muss mit der mechanischen Eigenfrequenz der Schwinger übereinstimmen, damit Ultraschallenergie abgestrahlt werden kann. Aus natürlichem Bergkristall ausgeschnittene Quarzdickenschwinger stellen die leistungsstärksten, aber auch teuersten piezoelektrischen Schwinger dar. Doch haben sie heute für Reinigungsaufgaben mehr historische Bedeutung, da sie nur für den hochfrequenten Ultraschallbereich (500...1000 kHz) geeignet sind.

Beim niederfrequenten Ultraschall, wo die Kavitation stärker ist, hat man lange Zeit mit keramischen Barium-Titanat-Schwingern gearbeitet, hauptsächlich in Amerika. Diese besitzen aber mehrere nachteilige Eigenschaften, weshalb sie nur noch in billigsten Geräten für einfache Reinigungsaufgaben eingesetzt werden. An deren Stelle verwendet man das verbesserte, aber teurere keramische Material: Blei-Zirkonat-Titanat (PZT). In der Praxis werden PZT-Schwinger in Sandwich-Form benützt, bei der also das keramische Element zwischen 2 Metallklötze gepresst ist und die Dicke dieser dreiteiligen Einheit die Resonanzfrequenz bestimmt. Keramische Schwinger lassen sich in ähnlicher Weise kapseln und dann als Tauchschwinger verwenden wie mit magnetostriktiven Elementen bestückte Plattenschwinger. Im allgemeinen erzeugt man mit PZT-Schwingern kleinere Energiedichten als mit Nickelschwingern. Diese verbesserten keramischen Schwinger können heute auch in kochendem Perchloräthylen (119 °C) im Dauerbetrieb verwendet werden, was mit Nickelschwingern bisher schon ohne weiteres möglich war.

Man sollte keine grosse Streitfrage daraus machen, ob im niederfrequenten Ultraschallbereich die Frequenz 20 kHz oder diejenige von 40 kHz günstiger sei. Mit PZT-Schwingern arbeitet man meistens zwischen 25 und 30 kHz. Der Wirkungsgrad von Nickelschwingern steigt mit abnehmender Frequenz. So werden diese Schwinger hauptsächlich im Bereich um 20 kHz eingesetzt, doch gibt es auch Nickelschwinger und mit magnetostriktiven Elementen bestückte Plattenschwinger bei ca. 40 kHz. Zur höheren Frequenz wird im allgemeinen dann geraten, wenn das bei 20 kHz stärker auftretende, von der Kavitation herrührende Zischgeräusch des oberen Hörbereiches in einem sonst ruhigen Arbeitsraum als unangenehm empfunden wird. In diesem Fall wird man jedoch nur unter der Bedingung bereit sein, eine gewisse Verminderung der Reinigungswirkung in Kauf zu nehmen, wenn sich diese ausschliesslich in einer zulässigen Verlängerung der notwendigen Beschallungsdauer auswirkt.

2.1.3 Ultraschallausbreitung und Schwingeranordnung. Beim Reinigen mittels Ultraschall ist darauf zu achten, wie sich die Ultraschallschwingungen in einer Flüssigkeit ausbreiten. Ein in einem Becken befindlicher kleiner Schwinger kann nicht die gesamte Flüssigkeitsmenge des Beckens gleichmässig mit Ultraschallenergie füllen. Vielmehr ist auf Grund physikalischer Gesetze [1]) das zum Reinigen wirksame Energiebündel im Querschnitt etwa nur so gross wie die Schwingerfläche selbst. Grob gesprochen kann man also den Ausbreitungsraum von Ultraschallschwingungen vor einem Tauchschwinger mit einem eng begrenzten Scheinwerferbündel vergleichen, und zwar unabhängig davon, ob es sich um einen in die Reinigungsflüssigkeit eingetauchten Blockschwinger oder um einen gekapselten Schwinger handelt. Die Ware oder der mit Reinigungsgut angefüllte Warenkorb sind vielfach grösser als die aus wirtschaftlichen Gründen meist klein gehaltene Schwingerfläche und müssen deshalb über dieser hin und her bewegt werden, was bei den kurzen Beschallungszeiten (10...60 s) nicht schwierig ist. Auch kann der Tauchschwinger vor grösserer Ware bewegt werden.

Günstiger in Bezug auf die Schallausbreitung liegen die Verhältnisse bei den Schwingwannen. Hier sind Schwinger-

[1]) Schwingungslehre: Ausbreitungsraum ist abhängig vom Verhältnis der Strahler-Abmessungen zur Wellenlänge der ausgesandten Schwingungen.

elemente aussen am Boden einer Wanne aus dünnem, tiefgezogenem Stahlblech so befestigt, dass das Flüssigkeitsvolumen in der Wanne verhältnismässig gleichförmig mit Ultraschallenergie gefüllt wird (Fig. 3). Man kann eine derartige Anordnung mit einem «akustischen Hallraum» vergleichen, dem man nur einen geringen Wirkleistungsanteil zuführen muss, um kräftige Resonanzerscheinungen zu erhalten. Auch hat man in den Schwingwannen im Gegensatz zu den Tauchschwingern keine ausschliesslich einseitige Schwingungsrichtung, d. h. zu der Schallstrahlung von unten her kommen auch seitliche Schwingungskomponenten. Es stellt allerdings einen deutlichen Nachteil dar, dass diese tiefgezogenen Schwingwannen nur in wenigen Grössen erhältlich und somit für viele Anwendungen zu klein und vor allem nicht tief genug sind.

Dieser Nachteil wird neuerdings durch die erwähnten Plattenschwinger (s. Ziff. 2.1.1) behoben. Das Flüssigkeitsvolumen in einer grösseren, geschweissten Wanne, die am Boden oder an einer Seitenwand mit Plattenschwingern ausgerüstet ist, kann ebenfalls zu Resonanzschwingungen erregt werden. Eine derartige Wanne wird auch als «Platten-Schwingwanne» bezeichnet. Jedoch müssen hiezu folgende Bedingungen erfüllt sein:

a) Die Wannenbegrenzungen müssen den Ultraschall gut reflektieren, d. h. die Wanne darf z. B. innen nicht gummiert sein und muss aussen an die Luft grenzen.

b) Möglichst 35 % oder mehr des Bodens bzw. einer Seitenwand sollen Schwingerelemente enthalten, um einen guten Resonanzeffekt zu erzeugen.

c) Eine Schwingwanne darf nicht durch Reinigungsgut mit ungeeignetem Volumen «überlastet» werden. Eine unregelmässig geformte, massive Ware mit dem Inhalt etwa der halben Flüssigkeitssäule würde die Ausbildung von Resonanzschwingungen in der Wanne völlig unterdrücken.

2.2 Hochfrequenzgeneratoren

Hochfrequenzgeneratoren wandeln die Frequenz des Netzes der Allgemeinversorgung in die Arbeitsfrequenz der Ultraschallschwinger um. Sie stellen meistens den kostspieligsten Teil der Ultraschallausrüstung dar.

2.2.1 Röhrengeneratoren. Für die herkömmliche und betriebssicherste Art der Hochfrequenzerzeugung benützt man elektronische Röhren. Es liegen genügend Erfahrungen vor, um Röhrengeneratoren mit ausreichender Leistungsreserve ohne Überlastung der Einzelteile aufzubauen, so dass es in dieser Beziehung praktisch nicht auf die letzten 10 % des Schwingerwirkungsgrades ankommt. Allerdings sei darauf hingewiesen, dass es keinen wirtschaftlichen Vorteil bringt, einen der auf dem Markt für die Induktionserwärmung oder für andere Zwecke erhältlichen Röhrengeneratoren auf die völlig anders geartete Anpassung von Ultraschallschwingern umbauen zu wollen.

2.2.2 Transistorisierte Generatoren. In jüngster Zeit werden Hochfrequenzgeneratoren angeboten, die nur noch Bauteile der Transistortechnik enthalten. Zweifellos vereinfachen Transistoren anstelle von Röhren den Geräteaufbau deutlich. Die Generatoren werden auch in ihren äusseren Abmessungen bedeutend kleiner. Während man nun den Einsatz von Transistoren für kleine und kleinste Leistungen heute bereits gut beherrscht, liegen jedoch noch nicht genügend Erfahrungen über die Dauerbetriebssicherheit von Hochleistungstransistoren vor, die, zu mehreren zusammengeschaltet, Hochfrequenz-Ausgangsleistungen von einem oder mehreren hundert Watt ergeben sollen. In diesen Fällen spielt das Kühlen eine entscheidende Rolle, so dass beim Ausfallen des Kühlsystems sofort sämtliche Transistoren zerstört werden. In Praxis kommt es auch meistens nicht darauf an, dass der Hochfrequenzgenerator möglichst kleine Abmessungen hat, zumal wenn man ihn räumlich getrennt vom Schwingersystem aufstellen kann. Auf das Transistorisieren ist man dagegen in dem äusserst seltenen Fall unbedingt angewiesen, wenn der Generator unabhängig vom Stromnetz nur mit Batteriebetrieb arbeiten soll.

2.2.3 Maschinengeneratoren. Während man also bei sehr kleinen Hochfrequenz-Ausgangsleistungen Transistoren an Stelle von Röhren verwenden kann, ist es nicht ratsam, für sehr grosse Ausgangsleistungen Röhrengeneratoren benützen zu wollen. Bei Hochfrequenzgeneratoren in der Grössenordnung von Rundfunksendern würden das Wasserkühlen der Röhren und die vielen zusätzlichen Sicherungsmassnahmen die Anschaffung und vor allem die Wartung viel zu teuer werden lassen. Da man meistens im Frequenzbereich um 20 kHz arbeiten will, haben sich statt dessen Maschinengeneratoren mit der Grundfrequenz von etwa 20 kHz hervorragend bewährt (Fig. 4). Sie sind äusserst robust und erfordern im Gegensatz zu anderen Röhrengeneratoren fast gar keine Wartung. Ob man allerdings auch schon für wenige (etwa 2...4) kW Ausgangsleistung Maschinengeneratoren einsetzen soll, hängt ausser von der Kalkulation noch von anderen Gesichtspunkten (s. Ziff. 2.2.5) ab.

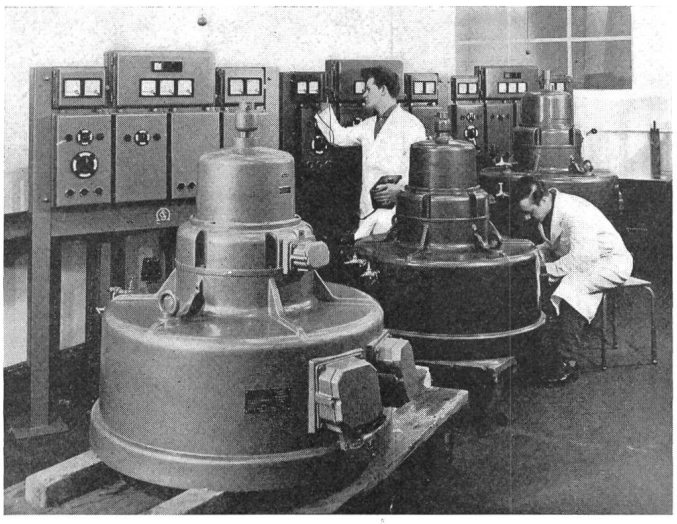

Fig. 4
Werkstatt-Abgleich von Maschinen-Generatoren mit der Grundfrequenz 20 kHz

2.2.4 Radioentstörung. Sämtliche besprochene Generatoren unterliegen dem «Hochfrequenzgesetz», da sie bei einer Frequenz höher als 10 kHz arbeiten, d. h., von diesen Generatoren darf über bestimmte, enge Grenzen hinausgehend keine Streustrahlung ausgesandt werden, durch die andere Funkdienste, u. a. Radio- und Fernsehempfänger, gestört werden könnten. Die Bestimmungen dieses Gesetzes sind in den einzelnen Ländern unterschiedlich streng. So beziehen sich die Vorschriften in den USA nur auf die Störstrahlung, die von der Einheit Generator-Schwinger in die Luft ausgestrahlt wird. Somit müssen nur die Gehäuse und Verbindungskabel ausreichend hochfrequenzmässig abgedichtet sein. Viel weitergehender und schwieriger zu erfüllen ist jedoch die deutsche Forderung, dass über die amerikanischen Vorschriften hinaus auch praktisch keine Hochfrequenz

durch das Netzanschlusskabel in das Netz der Allgemeinversorgung fliessen darf. Um das zu erfüllen, müssen die Generatoren zusätzlich am Netzkabeleingang ein kräftiges Siebglied enthalten, das aus starken Drosselspulen und Kondensatoren besteht.

2.2.5 Gleichschall und Impulsschall. Bis vor wenigen Jahren ist in Hochfrequenzgeneratoren europäischer Bauart die Netz-Wechselspannung (50 Hz) gut gleichgerichtet worden, so dass die Schwinger eine zeitlich annähernd gleichförmige Ultraschalleistung abgestrahlt haben. Hiebei hat sich also die mittlere abgestrahlte Leistung nur wenig von dem Momentanwert unterschieden, was mit «Gleichschall» (Fig. 5a) bezeichnet wird. Heute lässt man vielfach den gesamten Gleichrichterteil fort, so dass die Generatoren nur während der positiven Halbperiode Hochfrequenz erzeugen. Man nennt dies «Impulsschall» (Fig. 5b), da bei einer Netzfrequenz von 50 Hz ein Schwinger während 1/100 s zunächst gar keine Leistung abstrahlt (negative Halbperiode), innerhalb der darauf folgenden 1/100 s dagegen die abgegebene Leistung von Null auf einen Höchstwert steigt und sofort wieder auf Null sinkt. Hiebei ist der Scheitelwert viermal grösser als der zeitliche Mittelwert, weshalb die Leistung derartiger Generatoren meistens durch zwei Zahlen angegeben wird.

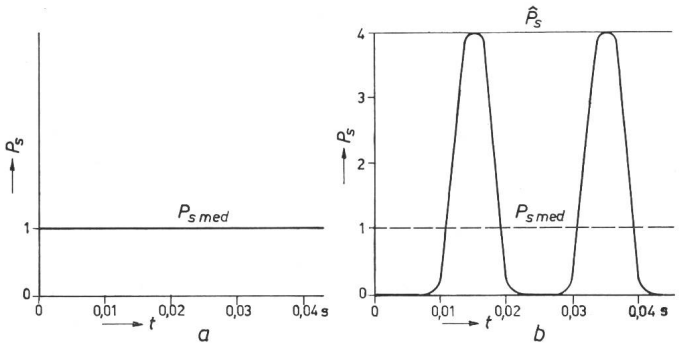

Fig. 5
Vergleich zwischen Gleichschall und Impulsschall
a Gleichschall; *b* Impulsschall
P_s Schalleistung; $P_{s\,med}$ mittlere Leistung; $\hat{P}_s$ Spitzenleistung; *t* Zeit

Beim Impulsschall sind nicht nur die Hochfrequenzgeneratoren einfacher und damit billiger aufgebaut, sondern es ergeben sich auch noch andere Vorteile. Oft ist die Reinigungswirkung besser, zumal beim Impulsschall die Reichweite der Ultraschallschwingungen grösser ist. Dann befinden sich nämlich zwischen Schwinger und Reinigungsgut nicht so viele Kavitations- und Gasbläschen, die durch Diffusion und Absorption die Schallausbreitung hemmen können. Auch erhält man kurzzeitig im Scheitelwert eine viel stärkere Ultraschallenergie. Ferner ist in Schwingwannen, deren Flüssigkeitssäule zu Resonanzschwingungen erregt wird, das dabei entstehende Zischgeräusch im Gleichschallbetrieb physiologisch viel lästiger als beim Impulsschall. Aus diesen Gründen werden heute Impulsgeneratoren überall bevorzugt.

Es bleibt weiterhin zu bedenken, dass an Maschinengeneratoren angeschlossene Schwinger nur Gleichschall abstrahlen können. Man wird es sich deshalb bei einem Hochfrequenzbedarf von nur wenigen kW sehr überlegen müssen, ob die Vorteile des Impulsschalls es nicht doch rechtfertigen, gegebenenfalls ein wenig höhere Anschaffungskosten für mehrere kleinere Röhrengeneratoren auszugeben, statt sich einen Maschinengenerator und somit Gleichschallbetrieb zuzulegen.

3. Reinigungsflüssigkeiten

Eine Ultraschall-Waschanlage muss nicht nur in technisch und wirtschaftlich sinnvoller Weise mit Ultraschallschwingern ausgerüstet sein, sondern es ist von gleicher Bedeutung, in ihr mit der jeweils geeigneten Reinigungsflüssigkeit zu arbeiten. Durch die Ultraschallschwingungen wird ja hauptsächlich mechanisch gereinigt, während in den meisten Fällen gleichzeitig eine chemische Wirkung benötigt wird, die eben von der chemischen Zusammensetzung der Reinigungsflüssigkeit auszugehen hat. Um z. B. fette Polierrückstände zu entfernen, muss in einer fettlösenden Flüssigkeit gereinigt werden. Bei einem chemisch ungeeigneten Reinigungsmittel nützt auch die beste Ultraschallausrüstung nichts, um innerhalb der fast immer geforderten kurzen Beschallungszeiten von einigen Sekunden oder höchstens 1...2 min den gewünschten Reinigungseffekt zu erzielen.

In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass keinesfalls zum Ultraschalleinsatz geraten sei, wenn *nur* eine chemische Wirkung erforderlich ist, die mit den bekannten Chemikalien erreicht werden kann. Die Kosten für einen zusätzlichen Ultraschallteil lohnen sich erst dann, wenn die bisherigen chemischen Reinigungsmethoden, evtl. verbunden mit geringen mechanischen Wirkungen durch Abspritzen o. ä., nicht ausreichen und deshalb von Hand gereinigt bzw. nachgereinigt oder auf ein besseres Ergebnis verzichtet werden muss.

Die Chemie der jeweils günstigsten Reinigungsflüssigkeit hängt von der Art der Verschmutzung und von dem Material des Reinigungsgegenstandes ab. Anderseits ist eine Ultraschall-Waschanlage für eine wässerige Reinigungsflüssigkeit grundsätzlich anders aufzubauen als für eine organische. Ähnlich unterscheiden sich die Nachbehandlungen.

4. Voruntersuchungen

Die bisherigen Ausführungen zeigen bereits, dass man verschiedene Möglichkeiten beim Aufbau einer Ultraschall-Reinigungsanlage hat: Es gibt unterschiedliche Schwingertypen und -formen. Die notwendige Schalleistungsdichte und die kürzeste, mögliche Beschallungszeit werden durch die Art der Verschmutzung festgelegt. Diese beeinflusst gleichzeitig auch die Auswahl der günstigsten Reinigungsflüssigkeit. Aus den Abmessungen der zu reinigenden Gegenstände und deren Stückzahl in der Zeiteinheit und aus der kürzesten Beschallungszeit folgt die Mindestgrösse der erforderlichen Schwingerfläche. Von dieser hängt wieder die Leistung des zugehörigen Hochfrequenzgenerators ab. Weiterhin ergibt sich aus der Form der Ware und aus deren Menge die Art des Teiletransportes durch die wirksame Beschallungszone. Ebenso bestimmen die Reinigungsflüssigkeit und vor allem die betrieblichen Verhältnisse die Nachbehandlungsmethode, die oft gleich bedeutungsvoll neben dem Ultraschallreinigen ist, z. B. wenn die Gegenstände nach dem Beschallen fleckenfrei getrocknet werden müssen.

Um aus dieser Mannigfaltigkeit den Weg zur wirtschaftlichsten Auslegung einer Ultraschall-Reinigungsanlage zu finden, sollte man ebenfalls mit dem speziellen Reinigungsgut Vorversuche durchführen, wie das schon seit langem üblich

ist beim Planen von Reinigungsanlagen ohne Ultraschallunterstützung.

5. Reinigungsbehälter und Arbeitsverfahren

Erst nachdem in vorangehenden Untersuchungen die schalltechnischen Werte (Schwingerart und -grösse, Beschallungszeit, Schalleistungsdichte u. a.), die Reinigungsflüssigkeit und das gesamte Arbeitsverfahren mit Vor- und Nachbehandlungen festgelegt worden sind, sollte man auch den Aufbau des Reinigungsbehälters planen. Eine Ultraschall-Waschanlage besteht ja aus zwei grundsätzlich verschiedenen Teilen: dem Ultraschallteil mit Schwinger und Hochfrequenzgenerator und dem Reinigungsbehälter.

5.1 Reinigungsbehälter für wässerige Lösungen

Können wässerige Lösungen von Alkalien, Säuren oder neutralen Netzmitteln als Reinigungsflüssigkeiten benützt werden, so bestehen die zugehörigen Reinigungsbehälter aus einfachen Wannen. Es wird dabei meist im Temperaturbereich zwischen 40 und 65 °C gearbeitet. Etwas mehr Aufwand muss bei den Behältern schon betrieben werden, wenn man die Vor- oder Nachbehandlungen berücksichtigt oder ein automatischer Teiletransport mit eingeplant werden soll.

5.1.1 Handbediente Waschanlagen. Am einfachsten liegen die Verhältnisse, wenn man eine geringere Stückzahl verhältnismässig kleiner Ware, die nicht allzu stark verschmutzt ist, in einer wässerigen Lösung reinigen kann und anschliessend nur mit Leitungswasser abspülen und im Heissluftstrom trocknen muss. Dann wird man eine der erwähnten (Ziff. 2.1.3) flachen Schwingwannen benützen, wobei für die Nachbehandlungen (Spülen und Trocknen) keine besonderen Behälter mehr erforderlich sind. Derartige Schwingwannen, die grösstenteils mit den in den Ziff. 2.1.1 und 2.1.2 beschriebenen Schwingertypen ausgerüstet sind und meist bei den Frequenzen 20 bis 40 kHz arbeiten, sind für Flüssigkeitsvolumina von 0,5 bis fast 100 l in vielfältiger Ausführung auf dem Markt erhältlich.

Allerdings sollte man immer darauf achten, dass in diesen Wannen die Schalleistung für den jeweiligen Anwendungszweck noch ausreichend gross und die Schallfeldverteilung genügend gleichmässig ist. Da heute noch kein Verfahren existiert, um die Schalleistung in der Flüssigkeit bei den niedrigen Ultraschallfrequenzen ausreichend genau zu messen, gibt das Verhältnis: Gesamtschalleistung dividiert durch das Volumen der Reinigungsflüssigkeit, also Watt/Liter, wenigstens einen relativen Vergleichswert an, solange die Flüssigkeitssäule nicht tiefer als etwa 20...30 cm ist. Ein geringerer Wert als 10 W/Lit. ist für viele Reinigungsaufgaben zu klein, während mehr als 20 W/Lit. selten benötigt werden.

Mit Platten-Schwingwannen (s. Ziff. 2.1.3) hat man viel bessere Möglichkeiten, den Reinigungsbehälter speziell an das Reinigungsgut bzw. an die Warengestelle anzupassen. Wenn man sich an die in Ziff. 2.1.3 festgelegten Bedingungen hält, dann kann man auch in Flüssigkeitsvolumina von mehreren hundert Litern einen Schwingwanneneffekt erzeugen. Je nach der Waren- oder Gestellgrösse wird man dabei einen oder mehrere Plattenschwinger am Boden, an einer Seitenwand oder, bei grösserer Wannenbreite, an zwei gegenüberliegenden Seitenwände anflanschen.

Als Beispiel für den praktischen Einsatz von Platten-Schwingwannen möge Fig. 6 dienen. Die Flüssigkeitssäule

Fig. 6
Praktischer Einsatz einer Platten-Schwingwanne mit Bewegungsvorrichtung
Abmessungen: 650 × 740 × 600 mm

der Beschallungswanne hat die Abmessungen: 650 × 740 × 600 mm. Die Bodenfläche ist nur zu knapp 42 % mit zwei senkrecht nach oben abstrahlenden Plattenschwingern ausgerüstet, die bei Impulsschallbetrieb eine mittlere Schalleistung von 1300 W erzeugen. Gereinigt wird in einer mit Netzmitteln angereicherten alkalischen Lösung, die durch thermostatisch geregelte Heizkörper auf etwa 65 °C gehalten wird. Bei dem starken Fettgehalt der eingebrachten Verschmutzung ist eine 50 mm breite Fettasche (rechts in Fig. 6) erforderlich, in die mittels einer Pumpe und eines Sprühsystems an der linken Seitenwand die auf der Flüssigkeitsoberfläche angesammelten Fettinseln abgeschwemmt werden. Das Reinigungsgut hängt auf Galvanisiergestellen, auf denen es nach dem Beschallen mit Leitungswasser abgespült und anschliessend sofort galvanisch veredelt wird. Zwei derartige Gestelle lassen sich gleichzeitig behandeln, wobei sie mittels einer einfachen Drehvorrichtung langsam auf und ab bewegt werden. Diese Warenbewegung ist grundsätzlich bei jedem Ultraschallreinigen zu empfehlen, da sie zur Verkürzung der Beschallungszeit (hier ca. 90 s) beiträgt.

Die mit den Plattenschwingern ausgerüsteten Reinigungsbehälter stellen gegenüber den früheren Anordnungen mit den Tauchschwingern oder den niedrigen Schwingwannen insofern einen Fortschritt dar, als man jetzt die Ware unmittelbar auf den meist recht grossen Galvanisiergestellen hängend reinigen kann, ohne dass — wie früher — ein arbeitsaufwendiges Umhängen erforderlich ist [2]. In diesen grossen Behältern mit mehreren 100 Litern Inhalt lassen sich auch andere ausgedehnte Gegenstände reinigen, wie z. B. komplette Schreib-, Rechen- oder ähnliche Maschinen im Überholungsdienst, die nur sehr wenig demontiert sind.

Die in Fig. 1 gezeigten Tauchschwinger verwendet man heute nur noch dann, wenn deren besonders grosse Schalleistungsdichte ausgenützt werden soll. Es dient dann meist der mit Tauchschwingern ausgerüstete Reinigungsbehälter auch gleichzeitig zum Vorreinigen bzw. Vorweichen. In

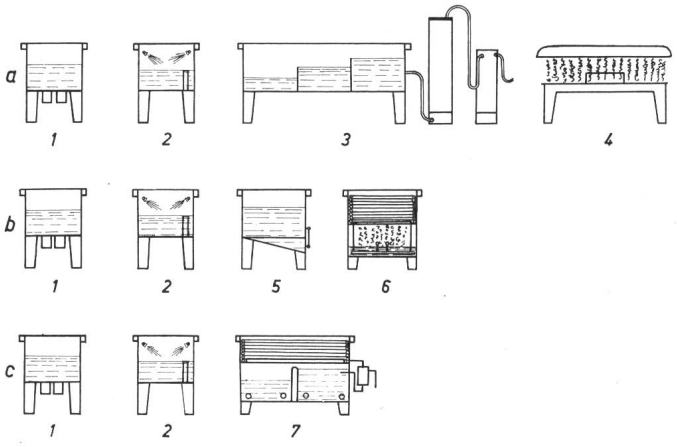

Fig. 7

Schematische Darstellung von drei Verfahren zum fleckenfreien Trocknen nach dem Ultraschallreinigen in einer wässerigen Lösung

a Abspülen in entionisiertem Wasser; *b* Benützen von wasserverdrängendem Öl; *c* Wasserverdrängen in heissen Chlorkohlenwasserstoffen *1* Beschallungswanne; *2* Wanne zum Abspülen mittels Leitungswasser durch Tauchen und anschliessendes Abspritzen; *3* Wanne mit kaskadenförmigen Kammern für entionisiertes Wasser und Wasseraufbereitungsanlage; *4* Heissluftfrocknung; *5* Behälter für das wasserverdrängende Öl mit Schauglas; *6* Tri- bzw. Per-Dampfgerät; *7* 2-Kammer-Anlage für das Wasserverdrängen in heissen Chlorkohlenwasserstoffen mit Wasserabscheider

dieser Art arbeiten viele Anlagen zum Reinigen von Brillengestellen in alkalischen Lösungen bei knapp 45 °C (mittlere Beschallungszeit: 15...25 s). Diese Gestelle müssen in der Fertigung mehrmals poliert und dementsprechend gereinigt werden. Nach dem Beschallen werden sie nur mit Wasser abgespült und getrocknet.

Die gesamte Waschanlage für das Arbeiten in einer wässerigen Lösung ist dann recht einfach aufgebaut, wenn die Ware nach dem Beschallen nur mit Wasser abgespült und sofort wassernass weiterverarbeitet werden soll, wie z. B. beim anschliessenden galvanischen Veredeln. Wird aber gefordert, dass die Ware zwecks anschliessender Konservierung getrocknet werden soll oder dass beim Abtrocknen keine Wasserflecken zurückbleiben dürfen, damit vor dem Weiterverarbeiten eine Kontrolle möglich ist, so muss etwas mehr Aufwand getrieben werden. Beim fleckenfreien Trocknen wassernasser Teile haben sich die in Fig. 7 schematisch dargestellten drei Verfahren hauptsächlich bewährt:

a) *Abspülen in entionisiertem Wasser:* Nach dem Beschallen, dem eine Vorbehandlung vorangehen kann, wird das Reinigungsgut mit Leitungswasser abgespült, anschliessend durch mehrere kaskadenförmig aufgebaute Kammern mit im Gegenstrom fliessendem entionisiertem Wasser geführt und dann mit — evtl. gefilterter — Heissluft getrocknet. Dieses Verfahren eignet sich nur bei begrenzter Stückzahl und für bestimmte Arten von Teilen.

b) *Benützen von wasserverdrängendem Öl:* Die gereinigte und wassernasse Ware wird 1...2 min lang in wasserverdrängendes Öl (dewatering fluid) getaucht. Soll nur eine Konservierung erfolgen, so ist bei bestimmten Ölzusätzen keine Weiterbehandlung notwendig. Wird aber eine völlig trockene, öl- und fleckenfreie Oberfläche gewünscht, so müssen die Teile in den Dampf über kochendem Trichloräthylen oder Perchloräthylen gehängt werden, wobei der Dampf an den kalten Gegenständen kondensiert und diese folglich durch Abspülen mit reinem Kondensat vom Öl befreit werden. Beim Herausheben aus der Dampfzone trocknen die Teile infolge der angenommenen Eigenwärme sofort fleckenfrei ab. Hier wird also noch zusätzlich ein Tri- oder Perdampfgerät gebraucht.

c) *Wasserverdrängen in heissen Chlorkohlenwasserstoffen:* Es ist bekannt, wassernasse, saubere Teile dadurch fleckenfrei zu trocknen, dass man sie zunächst in kochendes Perchloräthylen mit einem speziellen Zusatz taucht. Durch anschliessendes Tauchen in destilliertes Perchloräthylen wird der Zusatz wieder abgespült, und die heisse Ware trocknet sofort beim Herausnehmen ab («Wacker»-Verfahren). Ein wenig teurer ist die fast gleiche Methode, die Trichloräthylen benutzt («Tri-Sec-D»-Verfahren), doch werden dabei die Teile nicht auf ca. 120 °C erwärmt, sondern nur auf ca. 80 °C, was manchmal günstiger ist. Hiebei wird also eine 2-Kammer-Anlage benötigt mit Kühlschlangen u. a., was diese beiden Trocknungsmethoden gegenüber den unter a) und b) erwähnten, gerade bei grösseren Teilen, viel aufwendiger werden lässt.

Eine vollständige Ultraschall-Waschanlage sollte gegebenenfalls mit den in Fig. 7 angedeuteten Vorrichtungen und Behältern ausgerüstet sein, da das Reinigen heute meist nur den Teil eines kompletten Arbeitsverfahrens darstellt. Selbstverständlich gibt es auch andere Nachbehandlungsmethoden und Geräte dafür. Die höchsten Anforderungen werden gestellt, wenn optische Gläser so sauber gereinigt und rückstandsfrei getrocknet sein sollen, dass sie sofort anschliessend mit einem Entspiegelungsbelag vergütet werden können. In diesem Falle müssen die völlig sauberen, aber wassernassen Gläser zum Trocknen eine Reihe von Spülbädern, teilweise mit zusätzlichen Beschallungen, durchlaufen.

5.1.2 Anlagen mit automatischem Teiletransport. Wenn eine grössere Stückzahl annähernd gleichartig geformter Teile in ständiger Wiederkehr gereinigt werden soll, oder wenn das Reinigungsgut wegen seines grossen Gewichtes nicht von Hand durch die einzelnen Zonen der Ultraschall-Waschanlage geführt werden kann, dann ist ein automatischer Warentransport vorzusehen. Hiebei unterscheiden sich die Reinigungs- und anderen Behälter höchstens durch ihre Grösse von den handbedienten Anlagen. Die empfohlene Warenbewegung während des Beschallens ergibt sich dabei meistens von selbst. Fig. 8 zeigt einen kleinen Ausschnitt eines Galvanisierungsautomaten, der auch eine Ultraschall-Reinigungszone (Reinigungsflüssigkeit: eine wässerig-alkalische Lösung) bei der Vorbehandlung enthält. Die aus Messing bestehenden Hohlwaren (hauptsächlich ziselierte und durchbrochene Schalen) werden nach dem Polieren sofort auf Galvanisiergestelle der Abmessungen von etwa 700 × 550 mm gehängt. Vier derartige Gestelle — an einem grossen Querbalken befestigt — durchlaufen gleichzeitig die einzelnen Behandlungsbecken, bis die Ware versilbert und fleckenfrei getrocknet den Automaten verlässt. Als Hochfrequenzgenerator dient ein rotierender Umformer mit 12 kW Ausgangsleistung.

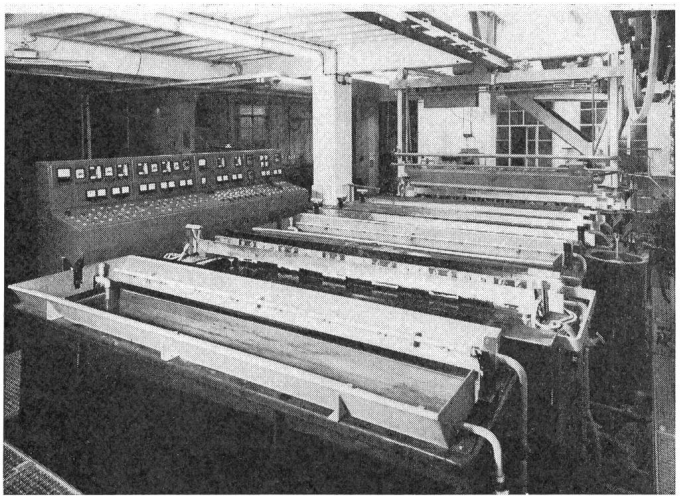

Fig. 8

Galvanisierungsautomat mit Ultraschall-Reinigungszone

Aus der Vielzahl der möglichen Transportsysteme sei nur noch die Karussellanordnung erwähnt. Die Warengestelle bzw. -körbe hängen an einem vielarmigen Drehkreuz und werden auf diese Weise in die auf einem Kreisring angeordneten einzelnen Kammern gesenkt. Nach dem Herausfahren dreht sich das Drehkreuz um eine Mittelsäule.

5.2 Reinigungsbehälter für organische Lösungsmittel

Da als organische Lösungsmittel in den meisten Fällen Trichloräthylen oder Perchloräthylen benutzt werden, müssen die entsprechenden Reinigungsbehälter die einschlägigen Vorschriften für Arbeiterschutz erfüllen. Es muss durch ein geeignetes Kühlsystem, durch eine kräftige Absaugung und mit Hilfe des Arbeitsverfahrens vermieden werden, dass unzulässige Mengen an Lösungsmitteldämpfen aus der Anlage in den Arbeitsraum gelangen. Leider hat es eine Zeitlang in dieser Beziehung ungeeignete Ultraschallanlagen gegeben.

Da bei Reinigungsbehältern für organische Lösungsmittel entschieden mehr Aufwand getrieben werden muss als wenn wässerige Lösungen verwendet werden können, ergibt sich die Frage, wann überhaupt mit diesen Lösungsmitteln gearbeitet werden soll. Hinzu kommt, dass in wässerigen Lösungen die mechanische Wirkung des Ultraschalls kräftiger ist als in organischen Lösungsmitteln, in denen ein weicheres Zusammenschlagen der Kavitationsbläschen (s. Ziff. 1.2) stattfindet. Es ist eben die stärkere chemische, meist fettlösende Wirkung, die — entsprechend den Ausführungen in Ziff. 3 — oft zu den Lösungsmitteln greifen lässt. Auch arbeitet man in diesen bei viel höheren Temperaturen (bis zu 115 °C) als mit wässerigen Lösungen, was oft zum Erweichen und Lösen der Bindemittel in Polierpastenrückständen wichtig ist. Ferner gibt es Gegenstände, für die aus mancherlei Gründen eine wässerige Behandlung nicht zuträglich ist.

5.2.1 Handbediente Waschanlagen. Fig. 9 zeigt schematisch den Aufbau und die Arbeitsweise einer von Hand zu

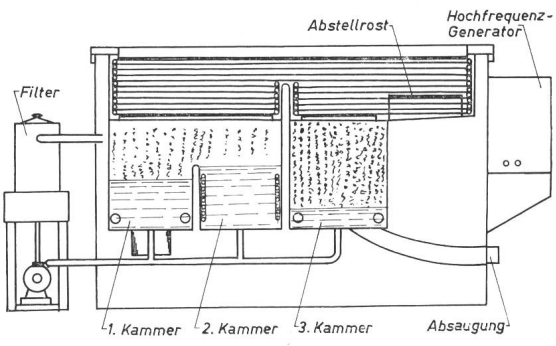

Fig. 9
Schematischer Aufbau einer Ultraschall-Waschanlage für heisse Chlorkohlenwasserstoffe

bedienenden Ultraschall-Waschanlage für Trichloräthylen bzw. Perchloräthylen als Reinigungsflüssigkeit. In der ersten Kammer wird bei einer Temperatur dicht unter dem Siedepunkt (ca. 85 °C bzw. ca. 115 °C) beschallt. Es lässt sich nun nicht vermeiden, dass beim Herausheben Schmutzteilchen, die in der Reinigungsflüssigkeit feinstdispergiert sind, mit den Gegenständen herausgeschleppt werden. Da aber beim Ultraschallreinigen die höchsten Anforderungen an die Oberflächensauberkeit gestellt werden, muss die Ware grundsätzlich nach dem Beschallen abgespült werden. Das erfolgt in der mit kaltem Lösungsmittel gefüllten zweiten Kammer. Die Anlage ist nun so eingerichtet, dass beim Überheben in diese

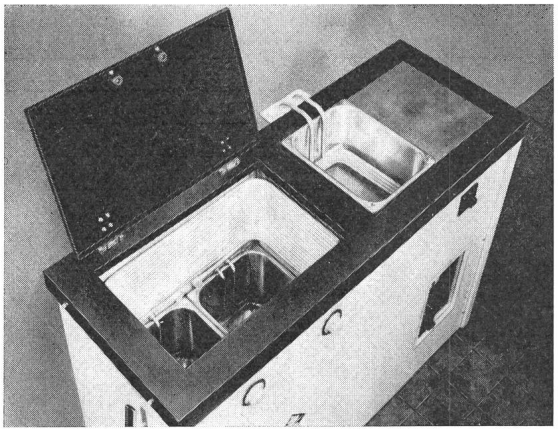

Fig. 10
Handbediente Ultraschall-Waschanlage für das Reinigen von Elektrizitäts-Zählwerken o. ä.

Kammer die mitgerissene heisse Reinigungsflüssigkeit der Beschallungskammer nicht antrocknen kann. Auch fliesst in die mit einer Kühlschlange ausgerüstete zweite Kammer ständig ein wenig Destillat zu, um hier im Laufe der Zeit ein unzulässig starkes Anreichern mit eingeschleppten Schmutzteilchen zu vermeiden. Das abgekühlte Reinigungsgut wird anschliessend in der dritten Kammer in den Dampf über kochendem Lösungsmittel gehalten, wo es infolge der einsetzenden Kondensation mit Destillat abgespült und gleichzeitig erwärmt wird. Wenn die heisse Ware auf dem etwas höher stehenden Abstellrost verbleibt, trocknen mitgenommene Destillatreste auf dieser schnell und fleckenfrei ab. Während des gesamten Arbeitsganges brauchen die Teile den Bereich des kräftigen Kühlschlangensystems nicht zu verlassen, was zusammen mit der starken Absaugung unterhalb des oberen Rahmens bewirkt, dass keine Lösungsmitteldämpfe aus der Anlage heraustreten.

Die Beschallungskammer enthält als Boden einen Plattenschwinger, der — je nach der erforderlichen Kammergrösse — durch einen Hochfrequenzgenerator mit einer mittleren Ausgangsleistung von 100...800 W bei Impulsschall erregt wird. Dieser Generator kann auf einer Konsole an der rechten Seite der Anlage stehen, während sich auf der linken Seite ein Filter mit Pumpe anschliessen lässt. In dieser Anlage ist also im Gegensatz zu den wässerig arbeitenden Systemen ohne grossen zusätzlichen Aufwand das Problem des fleckenfreien Trocknens der gereinigten Ware gelöst.

Neuerdings wird in zunehmendem Masse mit einem fluorierten Chlorkohlenstoff als Lösungsmittel gearbeitet, das trotz seines bedeutend höheren Preises zusätzliche Vorteile bietet. Im Gegensatz zu fast allen bekannten Lösungsmitteln greift dieses trotz seiner fettlösenden Eigenschaft Kunststoffe und Lacke im allgemeinen nicht an, so dass es zum Reinigen von Gegenständen, die ausser Metallen auch Kunststoffe und Lackierungen enthalten, verwendet wird. So behandelt man hiemit nur wenig demontierte Fernsprechrelais zusammen mit ihren Kabelsystemen und Zählwerke von Elektrizitätszählern im Überholungsdienst, gedruckte Schaltungen, die bereits mit Bauteilen bestückt sind usw.

In Fig. 10 ist ein handbedienter Reinigungsbehälter zu sehen. In den beiden linken Kammern wird gereinigt und unter Beschallung gespült. Mit Hilfe thermostatisch geregelter Heizungen wird in diesen Kammern die Temperatur dicht unter dem Siedepunkt, d. h. bei ca. 45 °C, gehalten. In der

dritten Kammer kann wahlweise in kaltem Lösungsmittel oder wässerig gereinigt werden. Ein rechts unten eingebauter Hochfrequenzgenerator versorgt über einen Umschalter jeweils eines der drei Becken.

5.22 Anlagen mit automatischem Teiletransport. Auch für das Reinigen in organischen Lösungsmitteln gibt es eine Menge automatischer Anlagen. Hier hat sich vor allem die beschriebene Karussellanordnung in geschlossener Bauweise bewährt. Es wird dabei fast immer nach dem in Fig. 9 skizzierten Verfahren gearbeitet. Nur wenn das Reinigungsgut zu umständlich gross ist, wie z. B. bei Teilen der Abmessungen von 1200 × 1000 × 600 mm, dann muss das Transportsystem einfacher gestaltet werden. Man leitet dann das heisse Trichloräthylen im Gegenstrom zur Warenbewegung durch den an den beiden gegenüberliegenden Seitenwänden mit einer Vielzahl von Plattenschwingern ausgerüsteten Reinigungsbehälter, und beim Herausheben spült man mit Destillat ab.

6. Reinigungsgut und Wirtschaftlichkeit

Die angedeuteten Beispiele zeigen bereits, dass jetzt nicht mehr, wie noch vor wenigen Jahren, ausschliesslich hochwertige Kleinteile mittels Ultraschall gereinigt werden. Ein Aufzählen der heute nach diesem Verfahren behandelten Gegenstände würde viel zu weit führen. Es sei deshalb nur folgendes kurz festgehalten: Man benützt die in den einmaligen Investitionskosten nicht billige Ultraschall-Reinigungsmethode hauptsächlich, um Personal einzusparen, das für Reinigungsaufgaben kaum noch zur Verfügung steht. Weiterhin wird heute nicht mehr bestritten, dass ultraschallgereinigte Teile sauberer sind. Man erhält also eine Qualitätssteigerung durch grössere Sauberkeit der Ware und kann damit die Ausschussquote bei der Fertigung herabsetzen.

Seitdem man durch das Einführen der Plattenschwinger grössere Reinigungsbehälter herstellen kann, ist man auch durch die Abmessungen der Teile nicht mehr so begrenzt. Man sollte sich deshalb in allen Fällen, in denen ein Reinigungsproblem vorliegt, überlegen, ob das Ultraschallreinigen angezeigt ist. Mit Hilfe der in Ziff. 4 erwähnten Voruntersuchungen kann man die Wirtschaftlichkeit dieses Reinigungsverfahrens recht gut vorher berechnen. Die Praxis zeigt, dass die Amortisationszeit auch aufwendiger Anlagen im allgemeinen ein halbes bis etwa 2 Jahre beträgt. Wenn also Ultraschall-Waschanlagen im Sinne der vorliegenden Ausführungen sorgfältig geplant und den speziellen Aufgaben zugeschnitten sind, dann steht das Ultraschallreinigen mit seiner bedeutenden Rationalisierung einen echten technischen Fortschritt dar.

Literatur

[1] *H. J. Gollmick:* Plattenschwinger zum Ultraschallreinigen. Galvanotechnik 54(1963)9, S. 511...516.

[2] *H. J. Gollmick:* Ultraschallreinigen in der Galvanik. Galvanotechnik 55(1964)9, S. 545...548.

Adresse des Autors:
Dr. *Hans Joachim Gollmick,* Physiker, Schoeller & Co., Elektrotechnische Fabrik, Mörfelder Landstrasse 115, D-6 Frankfurt/M. (Deutschland).

Steuerbare Siliziumleistungsventile (Thyristoren) und deren Anwendung für die Steuerung von Gleichstromanlagen sowie von Asynchron- und Synchronmotoren

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 28. April 1965 in Zürich,

von *Ed. Gerecke,* Zürich

621.314.632

1. Aufbau und Eigenschaften von Thyristoren

1.1 Aufbau

Der Thyristor (steuerbares Siliziumventil) arbeitet ähnlich wie ein Thyratron oder ein vermittelst Gittern steuerbarer Quecksilberdampfgleichrichter. Er besteht aus vier dotierten Siliziumschichten, nämlich nach Fig. 1 aus zwei stark positiv dotierten p-Zonen, einer stark negativ dotierten n-Zone und einer schwach negativ dotierten ν-Schicht, an welcher während der Sperrzeit die positive oder negative Sperrspannung auftritt. Gegenüber einer Diode weist der Thyristor eine zusätzliche Steuerelektrode *T* auf (Fig. 2), diese versieht die Funktion des «Gitters» beim Thyratron und wird oft auch als Tor (Gate, Gatter) bezeichnet. Der Thyristor besitzt nach Fig. 2

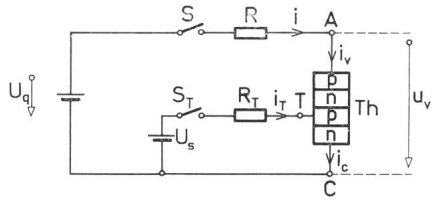

Fig. 1
Prinzipschaltbild für die Untersuchung eines Thyristors

U_q Spannungsquelle; *Th* Thyristor; *A* Anode; *C* Kathode; *T* Tor, Steuerelektrode, Gate; u_v Ventilspannung; $i = i_v$ Ventilstrom; i_T Torstrom; *R* Lastwiderstand; *S* Schalter; U_s Steuerspannung; R_T Steuerwiderstand; S_T Steuerschalter; *p* positiver Leitfähigkeitstypus; *n* negativer Leitfähigkeitstypus

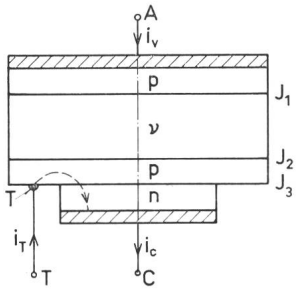

Fig. 2
Aufbau eines Thyristors

p stark positiv dotierte Schichten; *n* stark negativ dotierte Schicht; *ν* schwach negativ dotierte Schicht; i_c Kathodenstrom; i_T Torstrom; J_1 anodenseitige Junction; J_2 mittlere Junction; J_3 kathodenseitige Junction
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

drei Sperrschichtflächen (J_1, J_2, J_3, Junctions), an welchen die Dotierung das Vorzeichen wechselt. Bei der Herstellung geht man z. B. von der ν-Zone aus und erzeugt durch Diffusion oder Epitaxie die angrenzenden p-Schichten. Es ist dabei darauf zu achten, dass die Grenzschichten auch mikroskopisch